

Минимизация шероховатости поверхности лазерного реза методом рототабельного планирования

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт»*

Представлена тепловая модель процесса лазерной резки листовых материалов и механизм разрушения при резке металлов непрерывным лазерным излучением на низких и высоких скоростях. Методом рототабельного планирования оценено влияние скорости резания, мощности лазерного излучения и диаметра сфокусированного луча на шероховатость поверхности реза авиационных листовых материалов на примере сталей ВНС-5, 45, Х18Н10Т и титанового сплава ВТ-5.

Ключевые слова: лазерная резка, нагрев, механизм разрушения, шероховатость, скорость, мощность лазерного излучения, диаметр фокуса лазерного луча, метод рототабельного планирования.

Тепловая модель процесса лазерной резки листовых материалов

Основные количественные соотношения для лазерной резки можно получить из анализа следующей тепловой модели процесса. Тепловой источник мощностью q , равной поглощенной материалом доли лазерного излучения P , движется прямолинейно по поверхности бесконечной пластины толщиной s со скоростью v [4].

В соответствии с существующей теорией [1, 4] после воспламенения металла через некоторый промежуток времени устанавливается квазистационарный режим разрушения, при котором его скорость V_p определяется только температурой границы разрушения T_p в зоне обработки. Последнее выполняется, если струя кислорода полностью удаляет расплавленный окисел из зоны резки. Однако на механизм формирования реза существенно влияют и те явления, которые происходят на верхней кромке металла до момента установления квазистационарного разрушения.

В этот переходный период происходит нагревание верхней кромки металла от исходной температуры до T_p и ускорение границы разрушения до скорости V_p . При этом переходный процесс сопровождается перераспределением поглощенной и перешедшей в тепло энергии лазерного излучения [4].

В начальный момент граница разрушения неподвижна, все тепло отводится внутрь металла механизмом теплопроводности, а также расходуется (при достижении на верхней кромке детали температуры плавления металла $T_{пл}$) на образование прослойки жидкого металла, его окислов и нагрев этой прослойки до температуры T_p . Толщина нагретого слоя вблизи неподвижного фронта разрушения возрастает с течением времени t пропорционально $\sqrt{t}$ [4].

Скорость границы разрушения в переходный период остается незначительной по сравнению с квазистационарной. При достижении же температуры T_p скорость границы разрушения резко возрастает до значения V_p [4]. Следовательно, будем считать, что изменение скорости границы разрушения

носит ступенчатый характер: после некоторого запаздывания она достигает стационарной скорости движения V_p , определяемой только температурой поверхности металла T_p .

Время t_0 установления квазистационарного разрушения для малых скоростей обработки можно определить [4], учитывая, что нагревание металла происходит движущимся с постоянной скоростью v лазерным лучом, сфокусированным в круговое пятно радиуса r_l :

$$t_0 = \frac{2a}{v^2} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{kv(T_{кин} - T_n)}{W_p a}} \right], \quad (1)$$

где T_n – начальная температура металла, $[град]$; $T_{кин}$ – температура кипения металла, $[град]$;

W_p – плотность лазерной мощности, $W_p = \frac{4P}{\pi d_l^2}$ $[Вт/см^2]$; P – мощность лазерного излучения, $[Вт]$; $d_l = 2r_l$.

В течение времени t_0 лазерный источник переместится по верхней кромке металла на расстояние

$$x_0 = \frac{2a}{v} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{kv(T_{кин} - T_n)}{W_p a}} \right] \quad (2)$$

Кроме того, за это же время t_0 на верхней кромке вследствие механизма теплопроводности образуется зона жидкого металла и его окислов шириной (рис. 1, а)

$$x_s = \sqrt{a(t_0 - t_{пл})} \quad (3)$$

где $t_{пл}$ – время, необходимое для достижения температуры плавления металла $T_{пл}$.

$$\text{При этом } t_{пл} = \frac{2a}{v^2} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{kv(T_{пл} - T_n)}{W_p a}} \right] \quad (4)$$

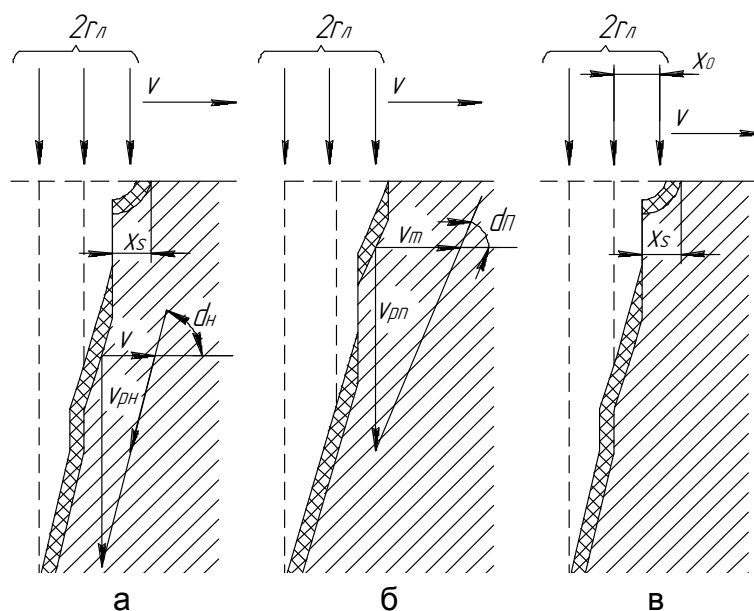


Рис. 1. Механизм разрушения при резке металлов непрерывным лазерным излучением на низких скоростях

Следовательно, если за время t_0 зона жидкого металла распространится в направлении резки на большее расстояние, чем переместится лазерный луч (что характерно для низких скоростей резки), т. е. $x_s > x_0$, то в течение этого времени перед движущимся лазерным лучом на верхней кромке образуется расплавленный участок. При дальнейшем движении лазерного пучка обработка на этом участке происходит только вглубь металла до тех пор, пока луч лазера вновь не достигнет верхней кромки металла (рис. 1, б).

Затем снова в течение времени t_0 происходит нагревание верхней кромки металла до температуры T_0 передней частью движущегося лазерного луча при неподвижной границе разрушения, тогда как за счет оставшейся части лазерного луча продолжается резание вглубь металла (рис. 1, в). Процесс периодически повторяется.

Таким образом, при малых скоростях резки разрушение вглубь металла происходит двояко. Вблизи переднего края лазерного луча протяженностью x_0 оно протекает периодически (со скоростью V_p^H) в течение времени прохождения лучом расстояния x_s и заключается в нагреве и разрушении детали периодически перемещающимся от поверхности вглубь металла источником тепла. В результате воздействия на металл остальной части сфокусированного луча, равной $(d_n - x_0)$, разрушение происходит непрерывно (со скоростью V_p^H). При этом поверхность фронта периодически протекающего разрушения наклонена по отношению к направлению резки под углом α_H , образованным скоростью V_p^H и скоростью распространения в металле тепловой волны V_T , а поверхность фронта непрерывного разрушения — под углом α_H , образованным скоростями V_p^H и v (см. рис. 1, а и б).

При низких скоростях резки микронеровности на поверхности реза образуются в результате наложения борозд шириной x_s друг на друга, и

теоретическое значение шероховатости поверхности может быть определено по формуле:

$$R_z = 0,134x_s \quad (5)$$

При высоких скоростях обработки, для которых $x_s < x_0$, температурное поле вокруг движущегося лазерного луча через некоторое время стабилизируется, и разрушение внутри металла происходит только лишь непрерывно (рис. 2).

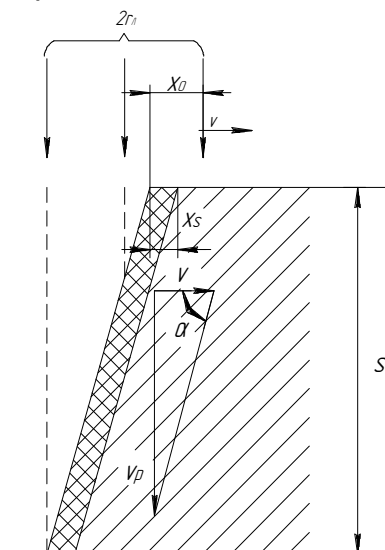


Рис.2. Механизм разрушения при резке металлов непрерывным лазерным излучением на высоких скоростях

В данном случае время достижения квазистационарного разрушения

$$t_0 = \frac{\pi k^2}{4a} \left[\frac{T_{\text{кин}} - T_n}{W_p} \right]^2 \quad (6)$$

Приведенные зависимости справедливы для широкого диапазона применяемых материалов, мощностей лазерного излучения, скоростей обработки [5]. Данная теоретическая модель может быть рекомендована для предварительных и оценочных расчетов режимов газолазерной резки металлов непрерывным лазерным излучением.

Минимизация шероховатости поверхности лазерного реза методом рототабельного планирования

Рототабельным называют такое планирование, которое позволяет получать модель, способную предсказывать значение параметра оптимизации с одинаковой точностью независимо от направления на равных расстояниях от центра плана [6].

Расчет ведется согласно рекомендациям, предложенным в [2, 3, 6]. Чтобы определить, какие факторы наиболее сильно влияют на значения шероховатости получаемой поверхности в заданных режимах обработки, необходимо поставить полный факторный эксперимент типа 23 (здесь: $3 = k$ – количество факторов, $N = m^k = 2^3 = 8$ – количество опытов, m – количество уровней каждого фактора).

Факторы, уровни и интервалы варьирования факторов для материалов – титанового сплава ВТ-5, сталей 45, ВНС-5 и Х18Н10Т приведены в таблице 1.

Таблица 1

Уровни и интервалы варьирования факторов

Факторы	Уровни			Интервалы варьирования
	верхний +1	основной 0	нижний -1	
x_1 – скорость резания, мм / с.	50,0	27,5	5,0	22,5
x_2 – мощность излучения, Вт	1000	750	500	250
x_3 – диаметр фокуса луча, мм	0,4	0,3	0,2	0,1

Скорость резания, мощность излучения и диаметр фокуса луча являются основными паспортными величинами лазерных технологических установок и входят в моделирование технологии газолазерной резки [1, 5, 7].

Для минимизации шероховатости R_z лазерного реза как одного из показателей качества обработанной поверхности материала используют зависимости 1 – 6.

Постоянные, входящие в эти зависимости, имеют следующие значения [3, 4]:

титановый сплав BT5: $T_{\text{кип}} = 3300^\circ\text{C}$, $T_n = 20^\circ\text{C}$, $T_{\text{пл}} = 2408^\circ\text{C}$,
 $k = 0,023 \text{ [Вт / мм} \cdot \text{град]}$, $a = 9,83 \text{ [мм}^2 \text{ / сек]}$;

сталь 45: $T_{\text{кип}} = 1600^\circ\text{C}$, $T_n = 20^\circ\text{C}$, $T_{\text{пл}} = 1570^\circ\text{C}$, $k = 0,0519 \text{ [Вт / мм} \cdot \text{град]}$,
 $a = 13,3 \text{ [мм}^2 \text{ / сек]}$;

сталь ВНС-5: $T_{\text{кип}} = 3250^\circ\text{C}$, $T_n = 20^\circ\text{C}$, $T_{\text{пл}} = 2300^\circ\text{C}$, $k = 0,02 \text{ [Вт / мм} \cdot \text{град]}$,
 $a = 5,3 \text{ [мм}^2 \text{ / сек]}$, $c = 0,5 \text{ [Дж / г} \cdot \text{град]}$, $\rho = 7,56 \text{ [г / см}^3 \text{]}$;

сталь Х18Н10Т: $T_{\text{кип}} = 1680^\circ\text{C}$, $T_n = 20^\circ\text{C}$, $T_{\text{пл}} = 1580^\circ\text{C}$,
 $k = 0,0155 \text{ [Вт / мм} \cdot \text{град]}$, $a = 4,088 \text{ [мм}^2 \text{ / сек]}$.

Матрица рототабельного планирования и результаты теоретического расчета получаемых значений шероховатости лазерного реза y представлены в таблицах 2 – 5.

Таблица 2

План факторного эксперимента типа 2^3 для титанового сплава BT-5

№ опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	$y(R_z)$, мкм
1	+	-	-	-	+	+	+	-	6,7
2	+	+	-	-	-	-	+	+	2,1
3	+	-	+	-	-	+	-	+	4,8
4	+	+	+	-	+	-	-	-	1,5
5	+	-	-	+	+	-	-	+	14,0
6	+	+	-	+	-	+	-	-	4,4
7	+	-	+	+	-	-	+	-	9,6
8	+	+	+	+	+	+	+	+	3,1

Таблица 3

План факторного эксперимента типа 2^3 для стали ВНС-5

№ опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	$y(R_z)$, МКМ
1	+	-	-	-	+	+	+	-	4,8
2	+	+	-	-	-	-	+	+	1,5
3	+	-	+	-	-	+	-	+	3,4
4	+	+	+	-	+	-	-	-	1,1
5	+	-	-	+	+	-	-	+	9,6
6	+	+	-	+	-	+	-	-	3,1
7	+	-	+	+	-	-	+	-	6,8
8	+	+	+	+	+	+	+	+	2,2

Таблица 4

План факторного эксперимента типа 2^3 для стали 45

№ опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	$y(R_z)$, МКМ
1	+	-	-	-	+	+	+	-	2,2
2	+	+	-	-	-	-	+	+	6,9
3	+	-	+	-	-	+	-	+	1,5
4	+	+	+	-	+	-	-	-	0,5
5	+	-	-	+	+	-	-	+	4,3
6	+	+	-	+	-	+	-	-	1,4
7	+	-	+	+	-	-	+	-	3,1
8	+	+	+	+	+	+	+	+	1,0

Таблица 5

План факторного эксперимента типа 2^3 для стали Х18Н10Т

№ опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	$y(R_z)$, МКМ
1	+	-	-	-	+	+	+	-	1,2
2	+	+	-	-	-	-	+	+	0,4
3	+	-	+	-	-	+	-	+	0,9
4	+	+	+	-	+	-	-	-	0,3
5	+	-	-	+	+	-	-	+	2,4
6	+	+	-	+	-	+	-	-	0,8
7	+	-	+	+	-	-	+	-	1,7
8	+	+	+	+	+	+	+	+	0,5

План типа 23 позволяет получить отдельные оценки для коэффициентов уравнения регрессии вида:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 \quad (7)$$

Коэффициенты уравнения регрессии (7) определяют по формулам:

$$b_0 = \frac{\sum_{j=1}^N y_j}{N}; \quad b_i = \frac{\sum_{j=1}^N x_{ij} y_j}{N}; \quad b_{il} = \frac{\sum_{j=1}^N x_{ij} x_{lj} y_j}{N}, \quad (8)$$

где i, l – номера факторов; x_{ij}, x_{lj} – кодированные значения факторов i и l в j -м опыте.

В результате расчетов получены следующие значения коэффициентов:

- для титанового сплава ВТ-5: $b_0 = 5,7668$; $b_1 = -3,0006$; $b_2 = -1,0464$; $b_3 = 1,973$; $b_{12} = 0,5606$; $b_{13} = -1,0346$; $b_{23} = -0,3938$; $b_{123} = 0,2241$.
- для стали ВНС-5: $b_0 = 4,0425$; $b_1 = -2,0725$; $b_2 = -0,702$; $b_3 = 1,36$; $b_{12} = 0,351$; $b_{13} = -0,684$; $b_{23} = -0,239$; $b_{123} = 0,114$.
- для стали 45: $b_0 = 1,8316$; $b_1 = -0,9394$; $b_2 = -0,3192$; $b_3 = 0,6092$; $b_{12} = 0,1573$; $b_{13} = -0,3158$; $b_{23} = -0,1035$; $b_{123} = 0,056$.
- для стали Х18Н10Т: $b_0 = 1,0113$; $b_1 = -0,5214$; $b_2 = -0,1746$; $b_3 = 0,33885$; $b_{12} = 0,0887$; $b_{13} = -0,173$; $b_{23} = -0,059$; $b_{123} = 0,0292$.

После подстановки коэффициентов в уравнение (7) оно принимает вид:

– для титанового сплава ВТ-5:

$$Y = 5,7668 - 3,0006x_1 - 1,0464x_2 + 1,973x_3 + 0,5606x_1x_2 - 1,0346x_1x_3 - 0,3938x_2x_3 + 0,2241x_1x_2x_3$$

– для стали ВНС-5:

$$Y = 4,0425 - 2,0725x_1 - 0,702x_2 + 1,36x_3 + 0,351x_1x_2 - 0,684x_1x_3 - 0,239x_2x_3 + 0,114x_1x_2x_3$$

– для стали 45:

$$Y = 1,8316 - 0,9294x_1 - 0,3192x_2 + 0,6092x_3 + 0,1573x_1x_2 - 0,3158x_1x_3 - 0,1035x_2x_3 + 0,056x_1x_2x_3$$

– для стали Х18Н10Т:

$$Y = 1,0113 - 0,5214x_1 - 0,1746x_2 + 0,33885x_3 + 0,0887x_1x_2 - 0,173x_1x_3 - 0,059x_2x_3 + 0,0292x_1x_2x_3$$

Кодирование независимых переменных осуществляется по формуле:

$$x_i = \frac{\%_i - \%_0}{\Delta \%_i} \quad (9)$$

где $\%_i$ – текущее значение технологического параметра в натуральной величине;

$\%_0$ – значение параметра на нулевом уровне;

$\Delta \%_i$ – интервал его варьирования.

Выводы

1. Из полученных уравнений видно, что наибольшее влияние на шероховатость поверхности лазерного реза R_z для листовых авиационных материалов оказывает скорость лазерной резки, затем диаметр фокусировки луча и, наконец, мощность непрерывного лазерного излучения.

2. Метод рототабельного планирования может быть рекомендован для предварительных и оценочных расчетов режимов резки листовых авиационных материалов непрерывным лазерным излучением.

Список литературы

1. Технологические лазеры: Справочник: В 2 т. Т. 1: Расчет, проектирование и эксплуатация/ Г. А. Абильсиитов, В. С. Голубев, В. Г. Гонтарь; Под ред. Г. А. Абильсиитова. – М.: Машиностроение, 1991. – 432 с.
2. Андрияхин В. М. Процессы лазерной сварки и термообработки. – М.: Наука, 1988. – 176 с.
3. Краткий справочник физико-химических величин. Под ред. К. П. Мищенко, А. А. Равделя – М.: Высшая школа, 1969. – 268 с.
4. Действие излучения большой мощности на металлы/ С. И. Анисимов, Я. А. Имас, Г. С. Романов и др. – М.: Наука, 1970. – 192 с.
5. Справочник по технологии лазерной обработки/ В. С. Коваленко, В. П. Котляров, В. П. Дятел и др. – К.: Техніка, 1985. – 167 с.
6. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.
7. Численное моделирование процессов лазерной резки листовых авиационных материалов / Ю.В. Дьяченко, А.В. Маковецкий, Е.Е. Хитрых [Текст]: Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2014. – Вып. 63. – С. 104-114.

Поступила в редакцию 21.01.2018

Мінімізація шорсткості поверхні лазерного розрізу методом рототабельного планування

Представлена теплова модель процесу лазерного різання листових матеріалів і механізм руйнування при різанні металів безперервним лазерним випромінюванням на низьких і високих швидкостях. Методом рототабельного планування оцінено вплив швидкості різання, потужності лазерного випромінювання та діаметру сфокусованого променя на шорсткість поверхні різання авіаційних листових матеріалів на прикладі сталей ВНС-5, 45, Х18Н10Т і титанового сплаву ВТ-5.

Ключові слова: лазерне різання, нагрівання, механізм руйнування, шорсткість, швидкість, потужність лазерного випромінювання, діаметр фокусу лазерного променя, метод рототабельного планування.

Minimization of the Surface Roughness of Laser Cutting by the Method of Rototable Planning

A thermal model of the process of laser cutting of sheet materials and the mechanisms of destruction during cutting of metals by continuous laser radiation at low and high speeds is presented. The influence of the cutting speed, laser radiation power and the diameter of the focused beam on the surface roughness of the aircraft sheet materials cut on the example of BHC-5, 45, X18H10T and titanium alloy BT-5 by rototable planning is estimated.

Keywords: laser cutting, heating, fracture mechanism, roughness, speed, laser power, laser beam focus diameter, rotatable planning method.

Сведения об авторах:

Юрий Вениаминович Дьяченко – канд. техн. наук, доцент каф. 104 «Технологии производства летательных аппаратов», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт».

Вячеслав Викторович Коллеров – канд. техн. наук, доцент каф. 104 «Технологии производства летательных аппаратов», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт».

Ирина Алексеевна Воронько – ассистент каф. 104 «Технологии производства летательных аппаратов», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт».

Вадим Олегович Гарин – к. техн. наук, старший преподаватель каф. 104 «Технологии производства летательных аппаратов», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт».

Трифонов Олег Валериевич – к. техн. наук, доцент каф. 104 «Технологии производства летательных аппаратов», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт».